МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.89 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-104-112

Влияние динамических свойств взаимодействующих подсистем на эволюцию формирования избирательного переноса в узлах трения*

В. Л. Заковоротный[1], В. Е. Гвинджилия[2], П. С. Колодкин[3]**
[1, 2, 3] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of dynamic properties of interacting subsystems on evolution of selective transfer formation in friction units***

V. L. Zakovorotny[1], V. E. Gvindzhiliya[2], P. S. Kolodkin[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Типичным примером процессов самоорганизации в трибосистемах является избирательный перенос. В этом случае в области контакта формируются сопрягающие поверхности сервовитной пленки, что принципиально меняет условия трения и изнашивания. Для образования избирательного переноса в зоне сопряжения контактирующих поверхностей необходима некоторая мощность необратимых преобразований подводимой энергии, которая зависит от упруго-диссипативных свойств контактирующих поверхностей.
Материалы и методы. Приводится математическая модель динамической системы с учетом эволюционно изменяющейся сервовитной пленки. Ее формирование зависит от фазовой траектории мощности необратимых преобразований в зоне сопряжения поверхностей и представляется в виде интегрального оператора Вольтерры второго рода.
Результаты исследования. Приводится анализ результатов исследования, в том числе зависимости формирования сервовитной пленки от динамических параметров взаимодействующих подсистем. Впервые рассматривается проблема математического моделирования эволюции свойств узла трения с образованием или разрушением сервовитной пленки.
Обсуждение и заключение. В ходе эволюционного процесса образования сервовитной пленки меняются параметры динамической связи, формируемой в узле трения. Следовательно, меняются и динамические свойства системы. Впервые проанализирована динамика трибосистемы в процессе образования избирательного переноса.

Ключевые слова: динамическая система трения, избирательный перенос, сервовитная пленка, эволюция.

Образец для цитирования: Заковоротный, В. Л. Влияние динамических свойств взаимодействующих подсистем на эволюцию формирования избирательного переноса в узлах трения / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия, П. С. Колодкин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 2. — С. 104−112. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-104-112

Introduction. Selective transfer is a typical example of the self-organization processes in tribosystems. In this case, joint surfaces of the servovite film are formed in the contact area, which changes fundamentally the friction and wear conditions. To form selective transfer in the area of mating surfaces, some power of the irreversible transformations of the input energy is needed, which depends on the elastic-dissipative properties of the contact surfaces.
Materials and Methods. The mathematical model of the dynamic system considering the evolutionarily changing servovite film is given. Its formation depends on the phase path of the irreversible transformations power in the area of surface matching, and it is represented by the Volterra integral operator of the second kind.
Research Results. The outcome analysis including dependences of the servovite film formation on the dynamic parameters of interacting subsystems is provided. The mathematical simulation of the evolution of the friction unit properties with the formation or destruction of the servovite film is first considered.
Discussion and Conclusions. During the evolutionary process of the servovite film formation, the dynamic coupling parameters generated in the friction unit, change. Consequently, the dynamic properties of the system also change. The tribosystem dynamics is first considered under the process of forming the selective transfer.

Keywords: dynamic friction system, selective transfer, servovite film, evolution.

For citation: V. L. Zakovorotny, et al. Effect of dynamic properties of interacting subsystems on evolution of selective transfer formation in friction units. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 104−112. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-104-112



*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-08-00022 от 09.01.2019 г.
**E-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, sinedden@yandex.ru, Goodman.2012@yandex.ru
*** The research is done on RFFR grant no. 19-08-00022 of 09.01.2019.

Введение. После опубликования работ И. Пригожина [1–3] и Г. Хакена [4, 5] многие вопросы функционирования технических систем, взаимодействующих с различными средами, рассматриваются с точки зрения их самоорганизации [6–12]. Если следовать синергетической парадигме анализа, то при изучении таких систем прежде всего следует выполнить процедуру расширения размерности пространства состояния [7, 8]. Это означает, что необходимо дополнительно рассмотреть модель среды в координатах состояния системы. Имеет место обмен со средой информацией, материалом, энергией и пр. Здесь возможны когерентные взаимодействия различной физической природы, то есть явления синергетики. Типичным примером самоорганизации является эффект избирательного переноса, открытый И. В. Крагельским и Д. Н. Гаркуновым в 1956 году [13]. Идеи самоорганизации были сформулированы в 60-е годы XX века Б. И. Костецким [14] и развиты в работах по структурной приспосабливаемости совместно с Л. И. Бершадским [15] и Н. А. Буше [16]. В ряде работ исследуется формирование сервовитной пленки в трибосистеме при ее выходе на режим избирательного переноса [17–22]. Показано, что для формирования избирательного переноса необходимы определенные трибохимические реакции, а также некоторая траектория мощности необратимых преобразований в области сопряжения «система — среда» [17–24]. При выходе на режим избирательного переноса наблюдаются автоколебания. В некоторых случаях формируются хаотические притягивающие множества деформационных смещений контактирующих пар [17, 22–24].

Материалы и методы. Таким образом, при изучении перехода на режим избирательного переноса необходимо рассматривать динамику трибосистемы в единстве подсистем, взаимодействующих через трение, и динамической связи, формируемой узлом трения. Параметры такой динамической связи и формирование сервовитной пленки зависят от траектории мощности необратимых преобразований по совершенной работе. В статье рассматривается математическое моделирование такой эволюционной системы и анализируется зависимость эволюции от динамических параметров взаимодействующих подсистем.

Результаты исследования

Математическое моделирование системы. При математическом моделировании воспользуемся ранее полученными результатами. В [17, 23, 24–26] показано, что основные динамические свойства системы трения можно раскрыть на основе следующих допущений:

— образец является абсолютно жестким;

— деформации индентора рассматриваются в плоскости, нормальной к контактирующей поверхности и проходящей через направление скорости относительного скольжения.

При изучении динамики можно ограничиться первыми формами колебаний. Тогда модель системы представляется уравнением

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=F_\Sigma(t), \tag{1}$$

где $m=\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$, $h=\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix}$, $c=\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} \\ c_{1,2} & c_{2,2} \end{bmatrix}$ — положительно определенные, симметричные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов; $X=\{X_1,X_2\}^T$ — вектор деформационных смещений вершины индентора; $F_\Sigma(t)=\{F_{1,\Sigma}(t),F_{2,\Sigma}(t)\}^T$ — вектор сил, действующих на вершину индентора (рис. 1).

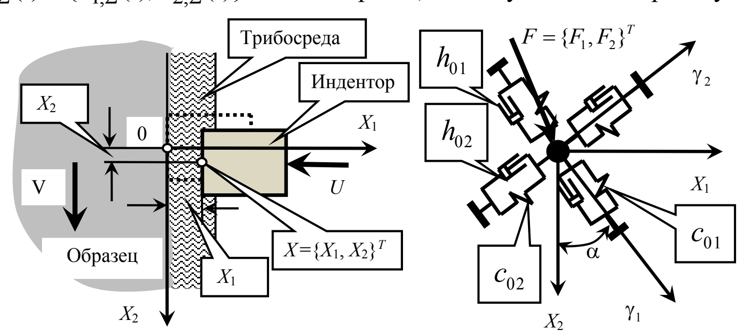


Рис. 1. Схема динамической системы трения

Будем следовать синергетической концепции анализа, то есть представим силы $F_\Sigma(t)$ в координатах состояния. Для этого введем понятие трибосреда — это третье тело, которое формируется в переходной зоне между контактирующими поверхностями. При сближении меняются условия их взаимодействий, что физически проявляется в изменении таких параметров, как фактическая площадь контакта, производство тепла, коэф-

фициент трения, условия молекулярного взаимодействия, процессы диффузии и пр. [27–30]. Однако первичными причинами всех изменений являются взаимодействия, обусловленные механикой контакта. В этом случае за счет изменения фактической площади контакта непропорционально быстро возрастают силы нормального давления, которые препятствуют сближению поверхностей. Моделирование этих сил [23, 24] удобно рассматривать в виде следующей функции сближения

$$F_1(X_1) = F_{1,0}\exp[-\alpha(X_1)] - U, \quad X_1 \in (0, +\infty), \tag{2}$$

где α — коэффициент крутизны нарастания силы контактного взаимодействия в $\left[мм^{-1}\right]$; U — внешняя сила.

В названных выше работах показано, что при формировании сервовитной пленки в функции сближения образуется потенциальный барьер, который фактически определяет несущую способность сервовитной пленки узла трения. Формирование потенциального барьера удобно представить в виде

$$\Phi_1(X_1) = \Phi_{1,0}\exp[-\alpha_1(X_1 - X_{1,0})^2], \tag{3}$$

где α_1 — параметр, характеризующий крутизну потенциального барьера в $\left[мм^{-2}\right]$; $X_{1,0}$ — координата потенциального барьера; $\Phi_{1,0}$ — эволюционный параметр в $\left[кг\right]$. Таким образом, функция сближения есть сумма $F_{1,\Sigma}(X_1) = \Phi_1(X_1) + F_1(X_1)$. Моделируя тангенциальную составляющую силы, примем во внимание, что при формировании сервовитной пленки силы трения на порядок меньше. Поэтому

$$F_{2,\Sigma}(t) = \begin{cases} k_T^{(1)} F_{1,\Sigma}(t), при: X_1 \langle X_{1,0}; \\ k_T^{(2)} F_{1,\Sigma}(t), при: X_1 \rangle X_{1,0}, \end{cases} \tag{4}$$

где $k_T^{(1)} \rangle\rangle k_T^{(2)}$.

Например, в системе трения «сталь — глицерин — латунь» после формирования сервовитной пленки коэффициент трения уменьшается более чем на порядок. Ранее показано, что силы контактного взаимодействия характеризуются запаздыванием тангенциальной составляющей силы (силы трения) по отношению к силам нормального давления. В этом случае вместо (4) имеет место соотношение

$$F_{2,\Sigma}(t) = \begin{cases} k_T^{(1)} F_{1,\Sigma}(t - T^{(1)}), при: X_1 \langle X_{1,0}; \\ k_T^{(2)} F_{1,\Sigma}(t - T^{(2)}), при: X_1 \rangle X_{1,0}, \end{cases} \tag{5}$$

где $T^{(1)}$, $T^{(2)}$ — постоянные времени запаздывания, зависящие от свойств трибосреды, сформированной в контактной области, и скорости относительного скольжения.

В (5) всегда выполняется условие $T^{(1)} \rangle\rangle T^{(2)}$. Кроме того, $T^{(1)}$ и $T^{(2)}$ уменьшаются при возрастании скорости относительного скольжения.

В дальнейшем принята гипотеза, согласно которой потенциальный барьер формируется в зависимости от траекторий работы и мощности необратимых преобразований при движении индентора относительно образца в направлении скорости относительного скольжения. Причем, на $\Phi_{1,0}$ влияет не только текущее, но и предшествующие значения мощности. Поэтому справедливо

$$\Phi_{1,0}(N) = \beta \int_0^t w(t-\xi) N(\xi) d\xi, \tag{6}$$

где $N = F_2(V + dX_2/dt)$ — мощность необратимых преобразований; $w(t-\xi) = \{\beta \exp[-\frac{1}{T}(t-\xi)]\}$ — ядро интегрального оператора, учитывающее влияние предшествующих значений мощности; T — параметр в $\left[c\right]$, характеризующий сохраняющееся во времени влияние мощности на потенциальный барьер; β — параметр в $\left[м^{-1}\right]$.

Уравнения (1)–(6) характеризуют математическую модель динамической системы трения с учетом эволюции ее свойств при образовании сервовитной пленки.

Изменение динамических свойств в зависимости от параметров потенциального барьера и динамических свойств индентора. Вначале рассмотрим свойства замороженной системы в предположении, что параметры сервовитной пленки являются заданными и неизменными. Положим также, что $T^{(1)} = 0$ и $T^{(2)} = 0$.

Рассмотрим пример изменения свойств системы в зависимости от стадий эволюционного преобразования (рис. 2).

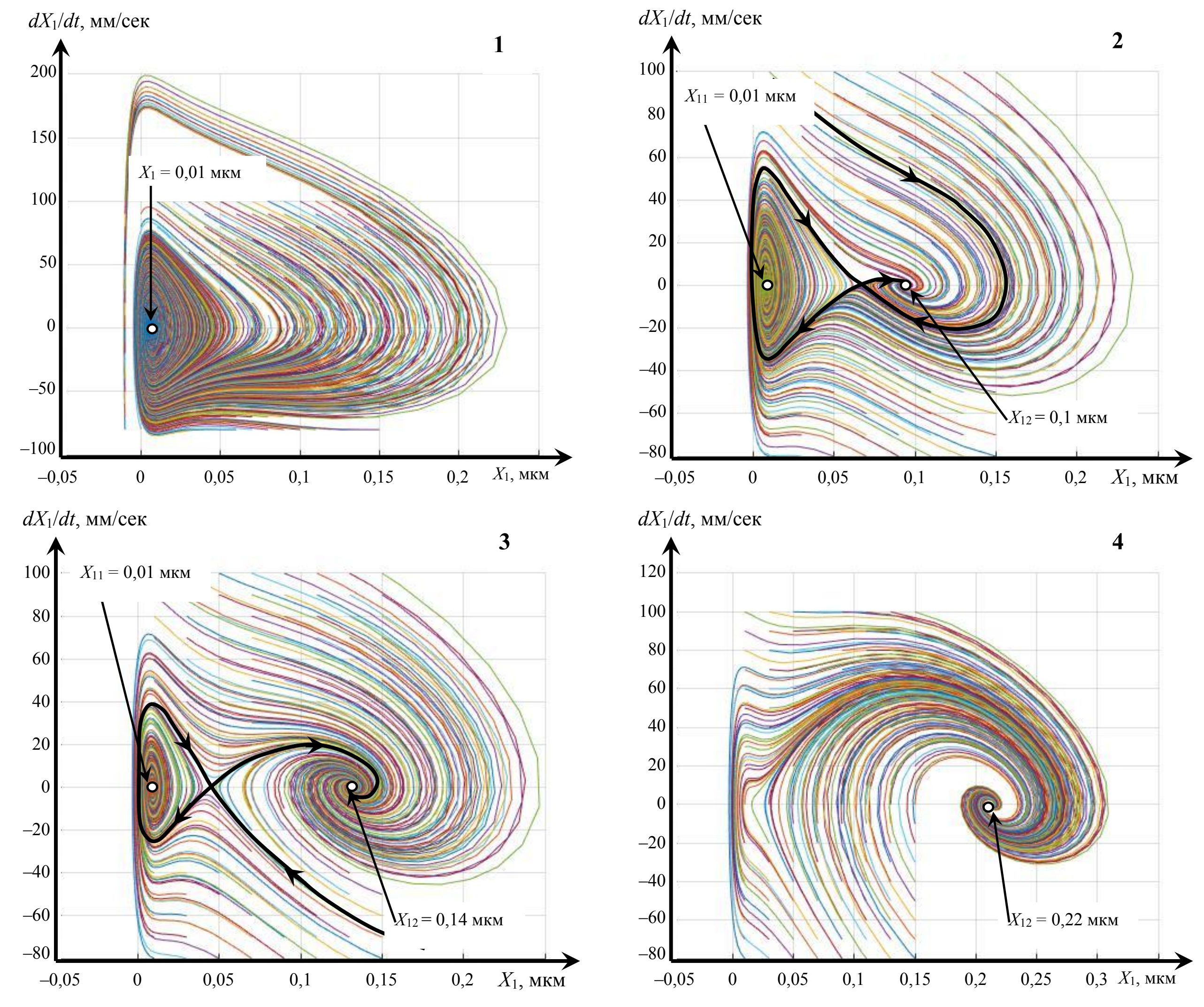


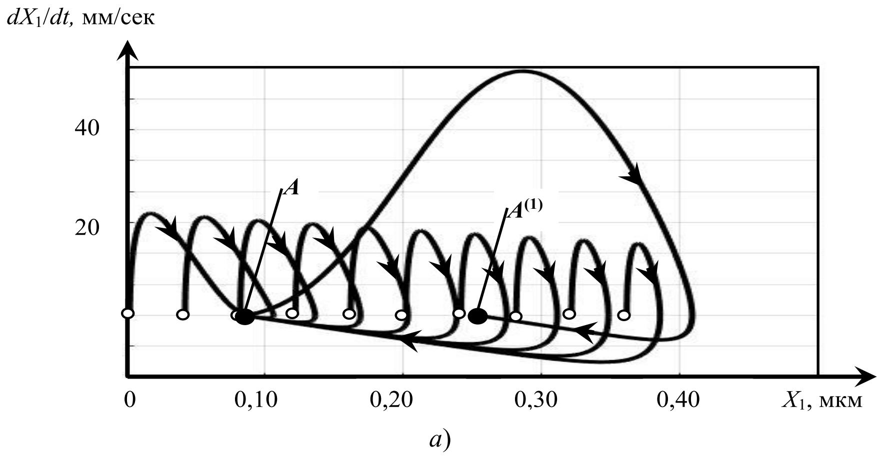
Рис. 2. Преобразование проекций фазовых траекторий на плоскости X_1 — dX_1/dt

На начальной стадии преобразований (часть рис. 2, помеченная цифрой 1) в системе формируется единственная точка равновесия, которой соответствует трение с традиционным коэффициентом в пределах 0,2–0,3. Причем эта точка обладает свойством глобального притяжения. Затем (часть рис. 2, помеченная цифрой 2) при формировании сервовитной пленки на начальной стадии образуются две точки равновесия ($X_{1,1}, X_{1,2}$). Область притяжения точки $X_{1,1,}$ ограничена седлообразной сепаратрисой. Вся остальная область характеризуется притяжением к точке $X_{1,2}$. Важно подчеркнуть, что в точке равновесия $X_{1,2}$ уже сформирована сервовитная пленка, но ее величина и свойства (определяются $\Phi_{1,0}$) не позволяют обеспечить притяжение траекторий всего фазового пространства. Поэтому в зависимости от начальных условий или возмущений (например, флуктуаций или формируемых притягивающих множеств деформационных смещений в вариациях относительно точки равновесия) возможно формирование свойств узла трения, которые принципиально отличаются друг от друга. В дальнейшем (часть рис. 2, помеченная цифрой 3) область, ограниченная седлообразной сепаратрисой, уменьшается и исчезает (часть рис. 2, помеченная цифрой 4). В последнем случае толщина сервовитной пленки и ее несущая способность возрастают. В модели это показано как увеличение потенциального барьера, и вторая точка равновесия приобретает свойства глобального притяжения. В этом случае в системе формируется стабильный избирательный перенос.

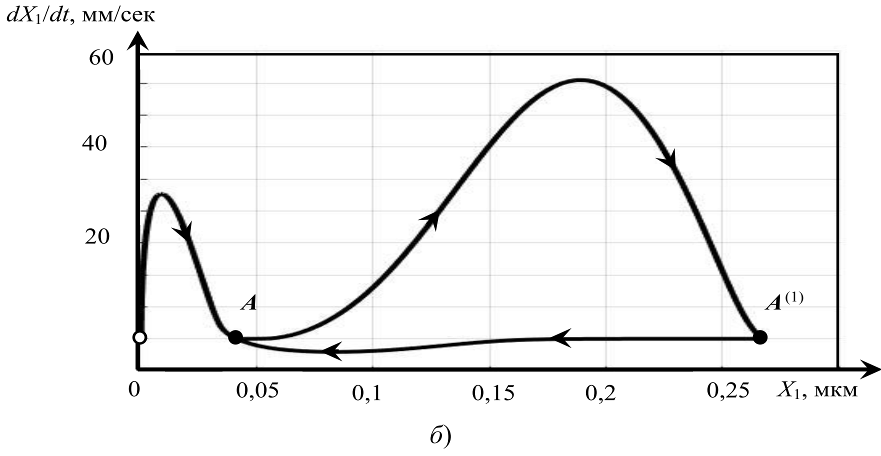
Иллюстрации характеризуют динамику системы в предположении, что свойства сервовитной пленки являются замороженными, то есть не эволюционируют. Однако и в этом случае области притяжения точек равновесия, соответствующих трению с сервовитной пленкой и без нее, принципиально зависят от динамических параметров индентора, прежде всего от матриц его жесткости c и диссипации h (1). В реальных условиях имеет место эволюция системы во времени. Она зависит от скорости относительного скольжения V_0, силы U, ис-

ходного состояния поверхности контактирующих тел и пр. На эволюцию, моделируемую интегральным оператором (6), влияют многие физические факторы, интегральный учет которых определяется ядром оператора. Поэтому при варьировании внешних условий (например, скорости относительного скольжения) необходимо учитывать влияние скорости на параметры интегрального оператора, а также на траекторию мощности необратимых преобразований. Экспериментально показано, что при увеличении скорости параметр $T_i, i = 1,2$ в (6) уменьшается. Кроме того, силы трения (а следовательно, и траектория мощности необратимых преобразований) зависят от скорости относительного скольжения. Заметим, что именно время, необходимое для установления стационарной сервовитной пленки, определяет один из показателей, позволяющих идентифицировать параметры ядра интегрального оператора.

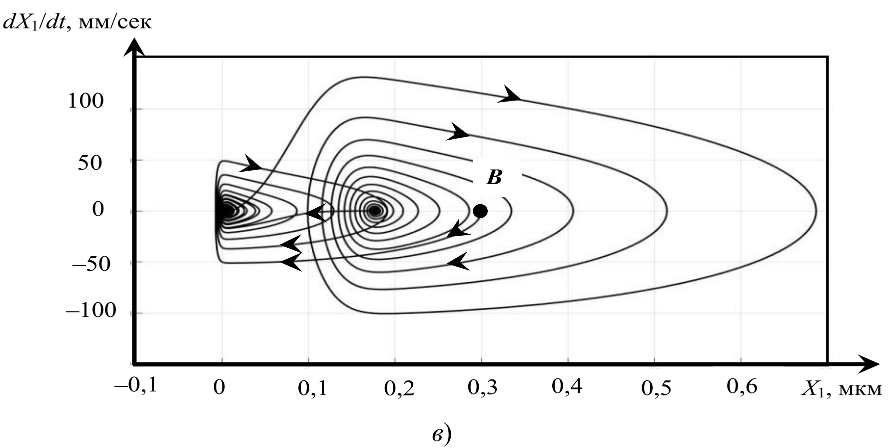
Не останавливаясь на деталях, приведем пример изменения фазовых траекторий деформационных смещений в направлении X_1 при варьировании динамических параметров индентора и свойств трибосреды (рис. 3).



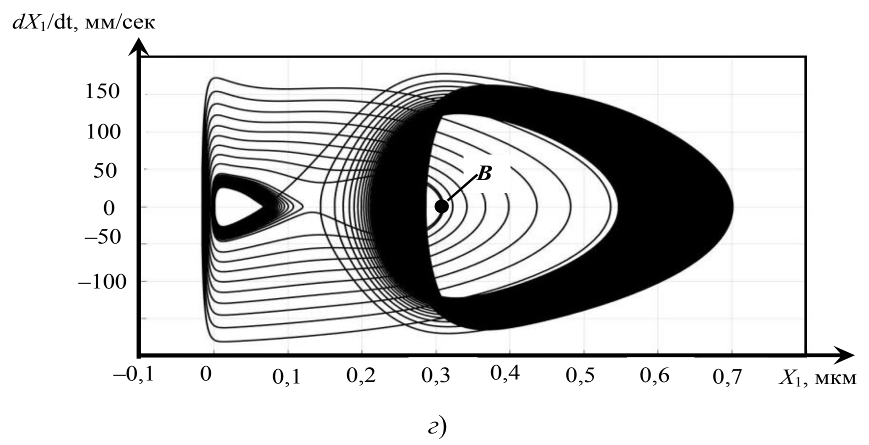
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Преобразование проекций фазовых траекторий на плоскость X_1 — dX_1/dt
в зависимости от параметров системы и условий трения

Прежде всего, рассмотрим трение с достаточно большой скоростью относительного скольжения $V_0 = 2{,}0\ м/с$. В этом случае при формировании сервовитной пленки уменьшается мощность необратимых преобразований и разрушение не наблюдается, так как скорость относительного скольжения достаточно высока (рис. 3, *а*). На начальном этапе при различных условиях траектории асимптотически притягиваются к точке равновесия без сервовитной пленки (точка *A* на рис. 3, *а*). После установления потенциального барьера все траектории эволюционируют к точке равновесия $A^{(1)}$ на сервовитной пленке. На рис. 3, *б*, *в* и *г* приведены эволюционные кривые с одним начальным значением, соответствующим точке *B*. При этом деформационные смещения и соответствующие им свойства системы трения стягиваются к одной из двух точек равновесия. Однако эволюционные кривые отличаются в зависимости от свойств трибосреды и добротности колебательных контуров подсистемы индентора без трения. На рис. 3, *б* приведен пример эволюционной траектории при условиях *а*, но при скорости относительного скольжения $V_0 = 1{,}0\ м/с$. В этом случае мощности, выделяемой в зоне трения, недостаточно для поддержания сервовитной пленки, и в системе периодически наблюдается трение с сервовитной пленкой и без нее. В деформационных смещениях это вызывает эффект низкочастотных колебаний. Характерно, что времена формирования и разрушения сервовитной пленки существенно отличаются. На рис. 3 это отображается значительным уменьшением скорости возвращения вершины индентора из точки $A^{(1)}$ в точку *A*.

Добротность подсистемы индентора можно увеличить (рис. 3, *в*). В этом случае в системе образуются сложные колебательные смещения. Некоторые их составляющие характеризуют низкочастотный материальный обмен между смазкой и поверхностью трения, а также колебательные смещения на частотах осцилляторов индентора. В направлении, ортогональном к скорости относительного скольжения, формируются циклические силы. Благодаря этому, а также за счет динамического взаимодействия возможно кратковременное образование сил, превышающих величину потенциального барьера. Ситуация еще более усложняется, если дополнительно учесть запаздывание вариаций тангенциальных составляющих сил по отношению к нормальным их составляющим (рис. 3, *г*). В зависимости от запаздывания формируются различные притягивающие множества деформационных смещений, а следовательно, и силы контактного взаимодействия. Замечено и формирование в системе хаотической динамики, вносящей большую неопределенность в закономерности образования сервовитной пленки.

Обсуждение результатов. Известно, что выход трибосистемы на режим избирательного переноса определяется трибохимическими реакциями и материальным обменом между контактирующими поверхностями и смазкой. Для выхода трибосистемы на режим избирательного переноса с образованием сервовитной пленки и ее поддержания в процессе трения необходима некоторая мощность необратимых преобразований подводимой энергии механической системы [17, 21–24]. В ходе эволюции динамической системы трения несущая способность формируемой сервовитной пленки меняется, что моделируется величиной потенциального барьера $\Phi_{1,0}$, препятствующего непосредственному контакту поверхностей трения. Если силы контактного взаимодей-

ствия в направлении, нормальном к этой поверхности, превышают $\Phi_{1,0}$, то наблюдается динамическая перестройка системы трения с частичным разрушением сервовитной пленки. Поэтому условия трения в режиме избирательного переноса зависят не только от трибохимических реакций и мощности необратимых преобразований, но и от динамического режима. Здесь принципиальное значение имеют устойчивость точки равновесия и формируемые в ее окрестности различные притягивающие множества деформационных смещений (предельные циклы, инвариантные торы, хаотические аттракторы). Кроме того, динамическую систему возмущают, например, биения при вращении заготовки. К тому же за счет принципиального изменения условий трения при непосредственном контакте и при контакте через сервовитную пленку меняется мощность необратимых преобразований в сопряжении поверхностей, что изменяет эволюцию и условия поддержания сформированной сервовитной пленки.

Заключение. Итак, можно сделать следующее заключение: на стабильность избирательного переноса влияют как динамические параметры взаимодействующих через узел трения подсистем, так и возмущения, всегда имеющие место в реальной машине. Поэтому при изучении избирательного переноса с целью обеспечения безизносности узла трения необходимо достичь идентичности динамических систем на машине трения и в реальной машине. Для этого можно воспользоваться известными приемами [27, 31].

Приведенные данные показывают, что на формирование сервовитной пленки в узле трибоконтакта влияют не только трибохимические характеристики контактирующих поверхностей, но и параметры взаимодействующих через трибосреду подсистем со стороны индентора и образца. Поэтому в каждом конкретном случае существует ограниченная область параметрического пространства динамических систем, а также возмущений, в которых образование избирательного переноса является правилом.

Библиографический список

1. Пригожин, И. Порядок из хаоса / И. Пригожин, И. Стенгерс. — Москва : Прогресс, 1986. — 432 с.

2. Пригожин, И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой // И. Пригожин, И. Стенгерс. — Москва : Едиториал УРСС, 2003. — 432 с.

3. Пригожин, И. От существующего к возникающему / И. Пригожин. — Москва : Наука, 1985. — 296 с.

4. Хакен, Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. — Москва : Мир, 1985. — 424 с.

5. Хакен, Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / Г. Хакен. — Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. — 320 с.

6. Эбилинг, В. Физика процессов эволюции. Синергетический подход / В. Эбилинг, А. Энгель, Р. Файстель. — Москва : УРСС, 2001. — 328 с.

7. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. — Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 344 с.

8. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А. А. Колесникова. — Москва : Физматлит, 2004. — 504 с.

9. Заковоротный, В. Л. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2018. — Т. 26, № 5. — С. 20–38. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.

10. Заковоротный, В. Л. Влияние флуктуаций на устойчивость формообразующих траекторий при точении / В. Л. Заковоротный, В. Е. Гвинджилия // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. — 2017. — № 2 (194). — С. 52–61. — (Технические науки). DOI: 10.17213/0321-2653-2017-2-52-61

11. Bifurcatscii stacionarnih mnogoobrasii obrazushikhsia v okrestnosti dinamicheskoi sistemi rezaniya [Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting.] / V. L. Zakovorotny [et al.] // Journal of Sound and Vibration. — 2016. — Vol. 368. — P. 174–190.

12. Заковоротный, В. Л. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 4. — С. 32–40.

13. Гаркунов, Д. Н. Эффект безизносности : научное открытие [Электронный ресурс] / Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский. — Режим доступа: http://ross-nauka.narod.ru/06/06-041.html (дата обращения 01.05.19).

14. Костецкий, Б. И. Структурно-энергетическая приспосабливаемость материалов при трении / Б. И. Костецкий // Трение и износ. — 1985. — № 2 (6). — С. 201–212.

15. Бершадский, Л. И. Самоорганизация трибосистем и концепция износостойкости / Л. И. Бершадский // Трение и износ. — 1992. — № 6 (13). — С. 1077–1094.

16. Буше, Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. — Москва : Наука, 1981. — 128 с.

17. Кужаров, А. С. Самоорганизация при трении / А. С. Кужаров, В. Л. Заковоротный // Трибология. Состояние и перспективы : сб. науч. тр. — Уфа : РИК УГАТУ, 2016. — С. 68–82.

18. Gershman, I. S. Formation of secondary structures and the self-organization process of tribosystems during friction with the collection if electric current / I. S. Gershman // Self-Organization During Friction: Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed / ed. German S. Fox-Rabinovich. George E. Totten. — Boca Raton ; London ; New York : Taylor & Francis, 2006. — P. 197–230.

19. Гершман, И. С. Синергетический подход к описанию и управлению изнашиванием / И. С. Гершман // Трибология. Состояние и перспективы : сб. науч. тр. —Уфа : РИК УГАТУ, 2016. — С. 82–87.

20. Gershman, I. S. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions / I. S. Gershman, N. F. Bushe // Surface and Coating Technology. — 2004. — № 185. — P. 405–411.

21. Кужаров, А. С. Особенности эволюционного перехода трибологической системы латунь-глицерин-сталь в режиме безизносного трения / А. С. Кужаров, Р. Марчак // Доклады РАН РФ. — 1997. — № 5 (354). — С. 642–644.

22. Кужаров, А. С. Концепция безизносности в современной трибологии / А. С. Кужаров // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. — 2014. — № 2. — С. 23−31.

23. Заковоротный, В. Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция / В. Л. Заковоротный. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2003. — 502 с.

24. Заковоротный, В. Л. Нелинейная трибомеханика / В. Л. Заковоротный. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2000. — 293 с.

25. Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. — Москва : Гостехиздат. — 1955. — 176 с.

26. Аппель, П. Теоретическая механика / П. Аппель. — Москва : Физматгиз. — 1960. — Т. 2. — 487 с.

27. Заковоротный, В. Л. Динамика транспортных трибосистем / В. Л. Заковоротный, В. В. Шаповалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2005. — № 12. — С. 19–24.

28. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. — Москва : Наука, 2001. — 478 с

29. Горячева, И. Г. Адгезионное взаимодействие упругих тел / И. Г. Горячева, Ю. Ю. Маховская // Прикладная математика и механика. — 2001. — Т. 65, № 2. — С. 279–289.

30. Мышкин, Н. К. Трение, смазка и износ / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — Москва : Физматлит, 2007. — 368 с.

31. Заковоротный, В. Л. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки / В. Л. Заковоротный, Е. В. Бордачев // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1995. — № 3. — С. 95–103.

Сдана в редакцию 25.02.2019
Принята к публикации 05.04.2019

Об авторах:

Заковоротный Вилор Лаврентьевич,
профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2187-9897
vzakovorotny@dstu.edu.ru

Гвинджилия Валерия Енвериевна,
аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1066-4604
sinedden@yandex.ru

Колодкин Павел Сергеевич,
магистрант кафедры «Автоматизация производственных процессов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6361-4750
goodman.2012@yandex.ru